第 40 卷　第 4 期
2023 年 8 月

应　用　力　学　学　报
Chinese Journal of Applied Mechanics

Vol. 40 No. 4
Aug. 2023

文章编号:1000-4939(2023)04-0965-08

有限元法在下肢肌骨系统生物力学研究中的应用进展

赖燕珠,谢红

(上海工程技术大学纺织服装学院, 201620 上海)

摘　要:随着各学科交叉融合不断深化,有限元法因其高效、精确、便捷等优点被广泛用于下肢肌骨系统生物力学研究,促进了临床个体化治疗、康复辅具、智能可穿戴等领域的发展,具有广阔的应有前景。以 Web of science、PubMed、CNKI 数据库为数据来源,“finite element and (lower limb or lower extremity or leg)”为英文检索词,“有限元、下肢”为中文检索词检索 2018—2022 年以下肢为重点的有限元研究。本研究系统阐述了有限元法在骨折预测及风险评估、骨折固定方法及固定器械力学分析、关节置换术评估中的临床应用,并探究了有限元法在骨应力分析、康复辅具力学分析、下肢-织物模型力学分析中的研究及应用。结果表明:有限元法可以建立符合生物力学理论的下肢模型,模拟计算各种工况,反映人体组织内部结构的应力应变情况,推动了临床医学个体化治疗研究的深入,促进了下肢康复辅具、智能可穿戴产品向智能化发展。未来的研究应着重提高有限元计算精度,将高精度测量技术、多体动力学肌骨模型与有限元法结合、建立人体-织物有限元模型,进一步促进下肢肌骨系统生物力学研究的广度和深度。

关键词:下肢;肌骨系统;生物力学;有限元

中图分类号:R318　　**文献标志码:**A　　**DOI:**10.11776/j.issn.1000-4939.2023.04.028

Advancement of finite element method’s application in biomechanics of the musculoskeletal system of lower limbs

LAI Yanzhu,XIE Hong

(College of Textile and Clothing,Shanghai University of Engineering Science,201620 Shanghai,China)

Abstract: With the deepening of interdisciplinary integration, the finite element method has been widely used in biomechanics study of the musculoskeletal system of lower limbs due to its advantages of high efficiency, accuracy and convenience, and has promoted the development of clinical personalized therapy, rehabilitation technical aids, smart wearable and other fields. Therefore, the method has broad prospects. With Web of Science, PubMed and CNKI databases as data sources, “finite element and (lower limb or

收稿日期:2022-04-29　　修回日期:2022-12-06
基金项目:国家重点专项基金资助项目(No. 2018YFC2000900)
通信作者:谢红,教授。E-mail:xiehong99618@126.com
引用格式:赖燕珠,谢红. 有限元法在下肢肌骨系统生物力学研究中的应用进展[J]. 应用力学学报,2023,40(4):965-972.
LAI Yanzhu, XIE Hong. Advancement of finite element method’s application in biomechanics of the musculoskeletal system of lower limbs[J]. Chinese journal of applied mechanics,2023,40(4):965-972.

lower extremity or leg)" as English key words and "finite element, lower limb" as Chinese key words were used to retrieve finite element studies focusing on lower limbs from 2018 to 2022. This study systematically formulated the clinical application of finite element method in fracture prediction and risk assessment, fracture fixation method and mechanical analysis of fixed instruments, and joint replacement evaluation. The study and application of finite element method in bone stress analysis, mechanical analysis of rehabilitation technical aids and mechanical analysis of lower extremity-fabric model were explored. The results show that the finite element method can establish the lower limbs model in accordance with the biomechanical theory, simulate various working conditions, reflect the stress and strain of the internal structure of human tissues, promote the in-depth study of clinical medicine personalized treatment, and promote the intelligent development of lower limb rehabilitation technical aids and smart wearable product. Future research should focus on improving the accuracy of finite element calculation, combining high-precision measurement technology, multi-body dynamic musculoskeletal model with finite element method, and establishing human-fabric finite element model so as to further promote the breadth and depth of biomechanical studies on lower limb musculoskeletal system.

Key words: lower limb; musculoskeletal system; biomechanics; finite element method

人体肌骨系统由骨骼、软骨、骨骼肌、韧带、肌肉和肌腱等生物组织组成,各种运动通过下肢肌群协同驱动髋关节、膝关节、踝关节实现。在日常生活中人体下肢关节和软组织等极易受到损伤、引发疾病,下肢疾病诊断主要依靠常规 X 线平片、核磁共振成像扫描(magnetic resonance imaging, MRI)、图像及计算机断层扫描(computed tomography, CT)等影像学手段,这些影像学手段呈现的是只代表某一截面解剖信息的二维图像,无法说明人体三维生物力学特性,而有限元建模法基于临床医学影像建立符合生物力学理论的下肢肌骨系统模型及细小的微观结构,模拟各种生物力学状态,计算得到肌骨系统内部的力学响应并可视化呈现,减少了许多不必要的时间与成本浪费,是生物力学研究数值化模拟的有效方法[1-2]。

近年来下肢肌骨系统生物力学研究正处于多学科交叉融合阶段,下肢肌骨系统的有限元建模愈发趋于准确化、精细化[3-4],在医学领域及医学和工程技术的交叉融合中发挥着至关重要的作用,促进了康复辅具的开发与优化以及纺织材料在人体防护装备中的应用,具有广阔的应用前景[5]。

本研究综述了近 5 年基于有限元法的下肢肌骨系统生物力学研究,从有限元法在临床、骨应力分析、康复辅具、人体-织物模型中的研究及应用 4 个方面进行阐述,并提出未来有限元法在下肢肌骨系统生物力学研究中的发展展望。

1 资料和方法

1.1 资料来源

在 Web of Science、PubMed、CNKI 数据库中全面检索 2018—2022 年以下肢为重点的有限元研究。Web of Science、PubMed 中以"finite element and (lower limb or lower extremity or leg)"为英文检索词,CNKI 中以"有限元""下肢"为中文检索词进行检索,以确定有限元法在各领域的所有应用。

1.2 纳入和排除标准

纳入与下肢或者腿、有限元相关的文献,其中包含论述有限元法在临床医学、骨应力、康复辅具、下肢-织物模型中的研究及应用的文献。如果有限元分析中未包括对下肢或下肢肌骨系统的分析,且内容重复、观点不新颖则排除。

1.3 质量评估及数据提取

Web of Science、PubMed、CNKI 数据库中初步检索得到 1 418 篇文献,并通过快速浏览文献标题和摘要的方式进行初步筛选。精读全文,进一步筛选与纳入标准一致的文献,最后选取 34 篇文献进行讨论,文献检索流程如图 1 所示。

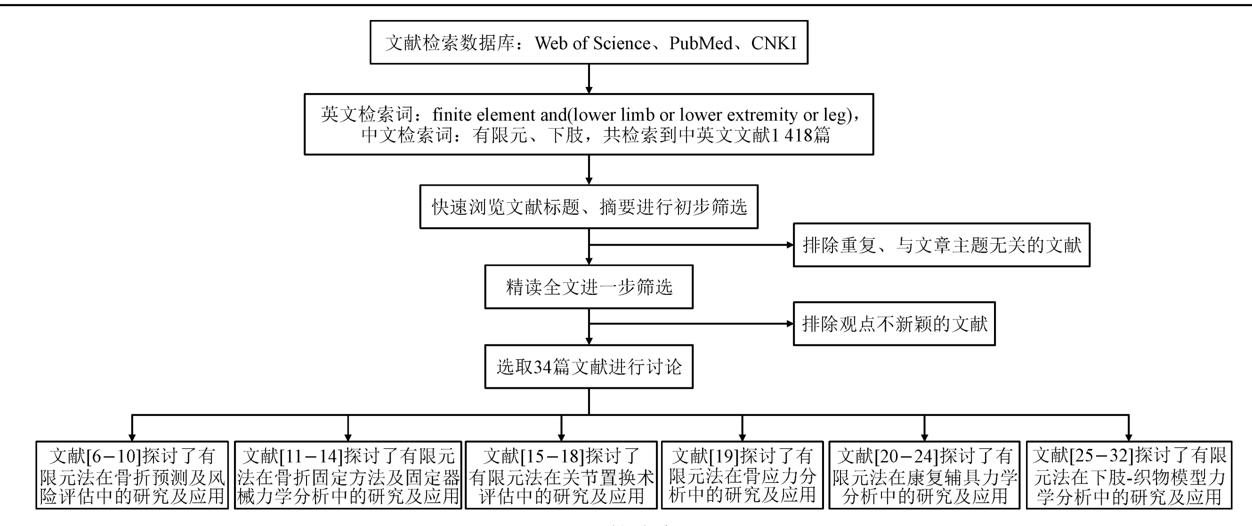


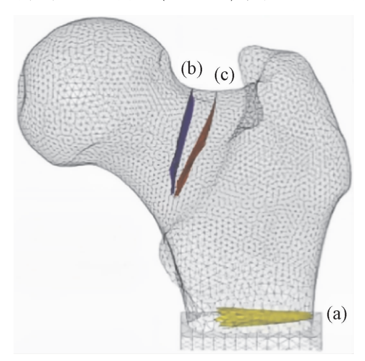
图 1　文献检索流程图

Fig. 1　Flow chart of literature retrieval

2　下肢肌骨系统的临床力学分析

2.1　骨折预测及风险评估

骨折是世界范围内的一个主要健康问题，有限元法克服了传统力学研究无法真实了解骨骼、韧带和软组织等内部应力、应变情况的缺点，为骨折机制、骨折风险评估、骨折的治疗、骨折的愈合等提供了科学的理论依据。跟骨骨折的各条断裂线的位置和方向复杂，使治疗具有挑战性，TSUBONED 等[6]基于患者 CT 建立了有限元模型，并进行了非线性跟骨骨折有限元模拟，准确预测了跟骨骨折线的位置，结果表明有限元模型可以精准重现跟骨骨折，对进一步了解跟骨骨折的病理机制具有重要价值。骨折风险的临床评估诊断是通过双能 X 射线吸收测定法(dualenergy X-ray absorptiometry，DXA)测量面积骨密度(aBMD)，但是骨密度只能解释 60% ~80% 的骨强度，其他骨骼特征例如骨骼几何形状、微结构、矿化、骨重建、微损伤等也与骨强度和骨折风险相关[7]。与使用 DXA 的临床金标准相比，通过有限元模型对骨强度进行估计，可以提高风险评估的预测能力[8]，GUSTAFSSON 等[9]建立了个体化股骨几何有限元模型，模拟单腿站立载荷条件下股骨近端的完整断裂过程，准确预测了两种股骨的骨折类型和骨强度，展示了离散损伤模型如何以患者实际情况考虑骨强度和断裂韧性来提供更完整的骨折风险图，如图 2 所示。为提高骨折预测的准确性以及骨折风险评估的能力，VILLAMOR 等[10]通过建立基于 DXA 的股骨近端有限元模型计算获得力学参数，并与支持向量机算法(support vector machine，SVM)结合建立机器学习模型用于预测髋部骨折，该模型的精确度比金标准骨密度(BMD)高了 14 个百分点。



(a)-均质模 a 在股骨干外侧，环氧树脂罐正上方断裂；(b)-均质模型 b 在股骨颈中部开裂，大概在横截面积最小的区域；(c)-非均质模型 c 在颈部距转子约 7 mm 处骨折

图 2　骨骼#1 的 3 种不同模型的预测裂纹路[9]

Fig. 2　Predicted crack paths for the three different models representing bone #1 [9]

2.2　骨折固定方法及固定器械力学分析

当关节受累大于 25%，且关节下移大于 2 mm 时，则认为有必要进行手术固定[11]，手术固定分为内固定和外固定，内固定主要是使用钢针、钢板、螺钉和髓内钉等进行骨折部位的固定，外固定则是通过外固定器、支架等进行骨折部位的固定，其目的在于促进骨折愈合、维持关节稳定[12]。内固定器械和骨骼之间的生物应力承载关系影响着骨折的愈合及内固定器械的寿命，因此骨折固定方法的评估与固定器械的设计及优化常通过有限元分析实现。

LING 等[13]分别建立了含“0”字型和“8”字型改良型张力带钢丝的髌骨骨折有限元模型，如图 3 所示，计算得到膝关节弯曲 45°时内固定物的应力，结果表明克氏针的矢状位置对改良型张力带钢丝有生物力学影响，在非负重伸展过程中，45°膝关节屈曲时，靠近关节面的克氏针可使骨折得到最佳的稳定性和应力，为临床实践中克氏针的定位提供了依据。胫骨 Pilon 骨折分为三级，Ⅰ型和Ⅱ型骨折的治疗可以通过使用钢板和螺钉等内固定器进行，外固定更适合应用于Ⅲ型的骨折治疗，基于临床经验，使用 Delta 外固定器具有低感染率和愈合率高的优点，RAMLEE 等[14]建立了足部和脚踝骨骼的三维有限元模型，并在胫骨近端施加轴向载荷以模拟站立和摆动阶段，计算得到 6 种 Delta 外固定器在Ⅲ型 Pilon 骨折中的应力及位移，通过比较可知 Delta1 的配置可以提供更好的稳定性，且产生更少的应力，为临床骨折愈合提供了一定的参考价值。

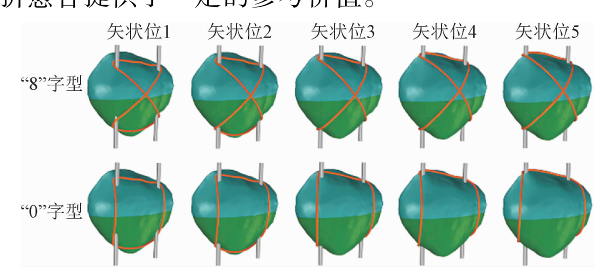


图 3 不同克氏针矢状位和不同接线方式的髌骨骨折模[13]

Fig. 3 Patella fracture models with different SPs of K-wires and different fashions of wiring[13]

2.3 关节置换术评估

关节置换术的目的是减缓患者关节疼痛，恢复关节结构及功能，有限元法被广泛应用于关节置换术术前规划、假体选择及优化、术后评估等。关节置换术术后可能出现关节功能性受限、假体松动及磨损、骨溶解、应力遮挡等情况[15]，植入物松动的主要原因之一是由于关节置换术导致植入物周围过度骨吸收，MONDAL 等[16]为探究全踝关节置换术后植入物-骨界面条件对胫骨周围骨重建的影响，建立了含植入物的完整脚踝有限元模型，将植入物-骨界面条件设为脱黏（非骨整合）和黏结（完全骨整合），预测踝关节周围在背屈、中立和足底屈曲状态下的骨密度变化，并建立了 3 种植入物材料组合的有限元模型用于探究植入物材料对胫骨周围骨重建的影响，模型 1 的胫骨和距骨组件由钴-铬-钼合金（Co-Cr-Mo）制成，半月板轴承由超高分子量聚乙烯（UHMWPE）制成，模型 2 的胫骨和距骨组件由陶瓷制成，半月板轴承由 UHMWPE 制成，模型 3 的胫骨和距骨组件由陶瓷制成，半月板轴承由陶瓷和碳纤维增强聚醚醚酮（CFRPEEK）制成。研究得出结论，假体和骨之间的适当结合对于减少植入物松动至关重要。植入物材料的变化显示骨密度没有显著变化，因此陶瓷可作为金属的替代品，CFR-PEEK 可作为 UHMWPE 的替代品，因其具有更好的耐磨性和更少的金属离子释放有利于假体的长期固定。AFFATATO等[17]将有限元模型用于研究髋关节植入物在多体肌骨模型的步态动态载荷下的力学行为，通过改变径向间隙（0 ~ 0.5 mm）研究了压力和变形在分布和振幅上的差异，结果表明，在步态过程中径向间隙对髋臼杯应力应变起着关键作用，该模型可以有效地用于关节的完整弹流滑膜润滑建模，对硅内磨损进行评估。单间室膝关节置换术（unicondylar knee arthroplasty，UKA）具有术后运动范围和功能结果改善、术后恢复和康复时间缩短等优点，KANG 等[18]对 5 个包括胫骨、股骨和相关软组织有限元模型进行了步态载荷下的动态分析，用以评估 UKA 股骨远端不同中心的生物力学影响，模型中股骨远端的中心分别从中立位置向内侧和外侧平移 3 mm 和 5 mm，结果表明，在 UKA 中，股骨远端髁的中心位置是股骨部分的最佳位置，股骨假体位置可能是影响聚乙烯植入物和关节软骨接触应力的敏感因素之一，如图 4 所示。

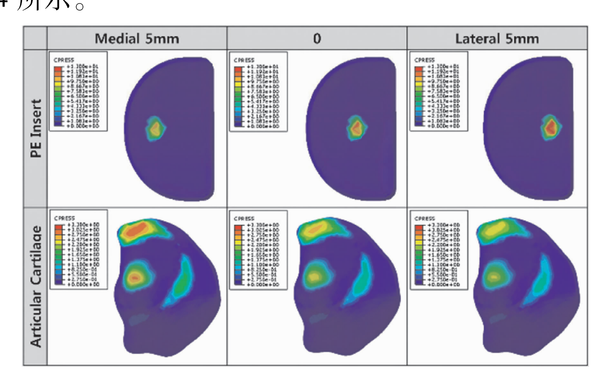


图 4 在 UKA 模型中，不同股骨位置的聚乙烯（PE）嵌件和关节软骨上的接触应力分布[18]

Fig. 4 Contact stress distribution on polyethylene (PE) insert and articular cartilage with respect to different femoral positions in UKA model[18]

有限元法可以区分个体之间的骨结构和密度差异，通过施加临床上所需的载荷及边界条快速获取模拟结果，真实了解生物组织表面及内部的应力、应变情况，从而在术前发现潜在的问题，为骨折的预测

及风险评估、骨折固定方法的选择、固定器械的设计及优化、关节置换术的评估等提供了极大的便捷，也为个体化临床治疗方案的制订提供理论支持。

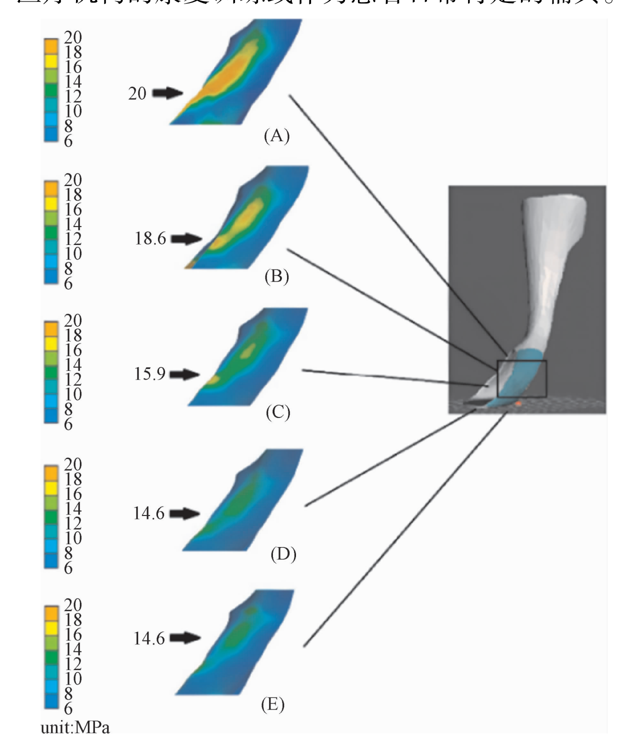
3 骨应力分析

人体下肢在日常生活中受到的损伤以及骨折术后都可能引发关节炎及其他退行性疾病，建立有限元模型可以进行精确的力学分析，从而获取受力情况下各关节面之间的接触情况、应力分布以及应力值等。轻度膝关节炎患者在日常步态行走过程中容易诱发疼痛或者导致关节炎加剧，张吉超等[19]通过有限元法模拟了膝关节在步态周期中屈曲 0°、10°、20°、30°的生物力学行为，对股骨软骨、胫骨软骨和半月板上的应力值、应力分布情况及接触面积变化进行了比较研究，得出轻度骨关节炎膝关节在屈膝角度改变时，因内侧半月板半脱位内侧接触面积减小，应力峰值增大且增幅大于内侧，外侧接触面积增大，关节内部负载过大可能导致关节软骨退变风险增加，进而加剧膝骨关节炎病变。

目前，通过有限元法进行静态模拟研究相对较多，动态研究相对较少，然而下肢的动态模拟更符合人体真实情况，可以真实反应动态下各关节面之间的接触情况及受力情况，广泛应用于疾病的诊断及术后康复情况的评估，是当下医学领域研究的热点。

4 康复辅具力学分析

我国呈现人口老龄化、慢病问题突出、大健康产业发展迫切，残障者个性化需求不断增加的趋势，康复辅具的开发和优化符合当下“主动健康”的发展背景，能够为老年人群体及残障者减轻一定的社会、经济负担[20-21]。下肢的康复辅具包括假肢、矫形器、下肢助力机器人等，生物力学在康复辅具的设计及优化中具有极为重要的作用。近年来 3D 打印技术因具有生物力学优势被广泛用于临床精确治疗及康复辅具的开发及优化，LIN 等[22]采用有限元法对 3D 打印的前踝足矫形器（3DP-AAFO）进行修正，增加前踝足矫形器模型颈部的厚度并评估其强度，对足底弯曲和背屈状态下的 3DP-AAFO 模型进行应力分析，有限元分析结果表明颈部的 3DP-AAFO 增厚达 4.7 mm 可以缓和应力集中，调整颈部 3DP-AAFO 的厚度可以有效提高其强度，如图 5 所示。人体下肢与辅具的生物力学交互作用是康复辅具优化设计的重要因素，康复辅具与人体直接接触对人体的舒适度有一定的影响，接受腔作为连接残肢与假肢的介质具有传递载荷的作用，杨海艳等[23]将残肢软组织定义为更符合人体实际情况的超弹性非线性材料，通过有限元法模拟站立时残肢穿戴全面承重（patellar tendon bearing，PTB）小腿接受腔和释压稳定（compression-release stabilization，CRS）接受腔接触界面的受力情况并进行比较，计算结果表明残肢与 CRS 接受腔、PTB 接受腔的界面应力都主要分布在胫骨内侧、胫骨外侧和后肌群等区域，但 CRS 接受腔残肢末端平均应力较 PTB 接受腔高 19 kPa，改变接受腔的可以改变残肢与接受腔接触界面的应力分布，有助于提高假肢的穿戴舒适性。LI 等[24]根据生物力学原理设计了一种具有刚柔耦合结构的可穿戴式下肢康复机器人，通过 MSC ADAMS 进行动力学仿真验证了机构的合理性，保证了康复辅具与人体的运动协调，为了达到轻量化的目的，通过有限元分析对外骨骼机构进行了优化，从性能评估实验可以看出该机构的外骨骼机器人具有舒适、轻便、成本低的优点，可用于医疗机构的康复训练或作为患者日常行走的辅具。



（A）-3.2 mm；（B）-3.7 mm；（C）-4.2 mm；（D）-4.7 mm；（E）-5.2 mm

图 5 足底屈曲时颈部不同厚度 3DP-AAFOs 的应力分布[22]

Fig. 5 Stress distribution of the 3DP-AAFOs with different thicknesses around the neck in plantar flexion [22]

有限元法被广泛应用于康复辅具设计及优化,可以很好地解决非线性问题,实现康复辅具的临床使用情况精确模拟等。此外,3D 打印等新技术与有限元分析结合更大地发挥了康复辅具领域的应用价值,智能纺织品因其具有高功能和高附加值等特点也成为了康复辅具行业智能化发展的新趋势。

5 下肢-织物模型力学分析

人体着服时,人体体表与服装动态接触产生压力,适度的服装压力会给人体带来积极的影响,不同的纺织材料、不同的编织技术产生的效果不同,压力服、医用压缩袜、压力绷带等弹力织物常被用于治疗增生性疤痕、预防和治疗静脉曲张、塑形、美体、减少运动疲劳及体育运动的防护和增能等[25]。GHORBANI等[26]将人体腿部模型赋予具有生物力学特性的材料属性,并构建了人体腿部-弹力纬编针织物有限元模型,模拟了腿部与压力服间的相互作用,模拟值与 Kikuhime 测压装置获得的实验数值高度相似,人体-织物有限元模型便于专家根据患者的需求和医生处方提供压力服,从而产生最佳治疗效果。医用压缩袜(medical compression socks,MCS)在治疗人类下肢静脉疾病方面的有益作用已得到认可,但是目前尚不清楚软组织损伤如何影响压迫疗法,压迫疗法在下肢不同区域的效果如何,基于核磁共振成像建立的有限元模型能够显示人体组织的内部结构,LU 等[27]建立了高度符合解剖结构的三维有限元下肢模型,该模型包含骨骼、肌肉群、静脉、皮下组织和皮肤,模拟了 MCS 穿套下肢的过程,研究了不同程度的外部压力对模型的影响以及病理条件下 MCS 的生物力学效应,结果表明,皮肤-MCS 界面处的压力很大程度上受外部压缩压力的影响,而压力不受肌肉组织损伤、小腿静脉损伤的影响,小腿静脉的体积减少分布不均匀,小腿静脉的损伤比肌肉组织的损伤更能增加跨壁压力,这项研究为压迫疗法提供了一些指导。

除了临床医学领域,人体-织物模型还被应用于体育竞技领域,LIN 等[28]建立了一个下肢三维动态有限元模型并模拟了下肢在站立、屈曲 30°、60°、90°和 120°时下肢-服装界面的接触压力和横截面压力,分析结果成功预测了下肢-运动服装的压力分布,有助于了解运动下肢装备和服装的压缩效应,以提高步行和跑步性能,促进运动服装的设计改进,以及老年人的被动或主动步行辅助设备。上海工程技术大学人体功效与功能服装实验室利用有限元软件建立了人体-织物三维生物力学模型(图6),人体模型包括手臂、膝盖、足部、下肢、肩部等,模拟人体的静、动态过程,该模型通过改变面料的材料属性获得人体与织物间的压力值,促进了功能性防护服装及装备的开发与优化[29-31],现阶段该实验室欲结合运动学、动力学、接触力学等理论,通过有限元软件进行下肢联动、瞬态撞击[32]等的数值模拟以探究更多状态下人体与织物间的动态连续压力监测问题以及瞬时接触问题。

有限元法可以精准地分析人体与织物间的静、动态接触压力,为智能可穿戴服装、功能性防护服的可靠性评价标准提供理论支撑,促进柔性健康监测设备的研发。



图6 人体-织物模型

Fig. 6 Human-fabric model

6 有限元法的优势与局限

有限元法为下肢肌骨系统生物力学研究提供了一种有效手段,其优势在于:①三维有限元模型可以根据人体实际的材料属性建立符合生物力学理论的下肢模型,提高了仿真的精度;②更加便捷、精确、全面地分析计算出各种工况下的数据,反映了人体组织内部结构的应力应变变化情况,可广泛用于临床规划、诊断、预测等;③有限元法应用于康复辅具、功能性防护装备的研究便于对产品进行设计及优化,降低了开发成本及人力物力的浪费,避免了各种外界因素导致的误差。

有限元法在下肢生物力学研究中具有许多优势,但仍存在局限性,其局限在于:①有限元模型的建立是通过 CT、MRI 等图像进行逆向工程软件处理

得到的,具有个体化特性,分析结果是否广泛适用还需讨论;②许多学者为了节省计算成本将有限元模型进行了简化,人体下肢及其他组织被视为刚体或者各向同性、均质的线弹性材料,与真实的人体情况有一定的差距,影响计算精度。

7 发展展望

1)提高有限元计算精度。有限元法计算精度的提高是未来发展的关键问题,三维人体有限元模型从宏观逐渐向微观发展,下肢结构中细微的韧带、血管等组织的建立大大提高了有限元模拟的精度,为临床预测、风险评估及临床个性化预测、治疗、评价提供了更为精准的数据及理论支持。

2)高精度测量技术、多体动力学肌骨模型与有限元法结合。随着计算机技术和高精度测量技术的不断发展与进步,借助三维运动捕捉系统、测力台系统以及柔性传感设备等新技术、新方法可以获取高精度的人体下肢动力学数据,LifeMod、ADAMS、AnyBody 和 OpenSim 等多体动力学肌骨建模软件可以实现人体各类活动的仿真并获得具体的肌肉力、关节力等信息以及关节间的相互作用力等,将高精度测量技术、多体动力学肌骨模型与有限元分析软件结合可以促进人体运动现象和规律的研究,以达到提高运动成绩、预防运动损伤和探究康复理论等目的。

3)建立人体-织物动态模型。在纺织服装领域,纺织材料在柔性可穿戴设备的开发中发挥着重要的作用。有限元法可以赋予织物真实的材料属性,通过有限元法建立人体-织物模型模拟人体下肢的动态过程不仅能了解人体与织物间的接触情况,为功能性服装及医用服装的设计及优化提供理论支撑,还能为智能可穿戴柔性传感器的压力监测提供评价指标,纺织材料、动力学数据与有限元法的结合促进了柔性下肢康复辅具的开发、优化及效果预测。

参考文献:

[1] 李杏芮,陈清,盛华均,等. 膝关节三维有限元模型的构建及生物力学分析[J]. 西南大学学报(自然科学版),2015,37(5):73-77.
LI Xingrui,CHEN Qing,CHENG Huajun,et al. Establishment and biomechanical analysis of a 3-D finite element model of the knee [J]. Journal of Southwest University (natural science edition), 2015,37(5):73-77(in Chinese).

[2] MORALES-ORCAJO E,BAYOD J,BARBOSA DE LAS CASAS E. Computational foot modeling: scope and applications[J]. Archives of computational methods in engineering,2016,23(3):389-416.

[3] AHREND M D, NOSER H, SHANMUGAM R, et al. Development of generic Asian pelvic bone models using CT-based 3D statistical modelling[J]. Journal of orthopaedic translation, 2020, 20: 100-106.

[4] 宫赫,张萌,邹姗姗. 肌骨系统生物力学建模 2021 年研究进展[J]. 医用生物力学,2022,37(1):18-26.
GONG He,ZHANG Meng,ZOU Shanshan. Research advances in musculoskeletal biomechanical modeling in 2021 [J]. Journal of medical biomechanics,2022,37(1):18-26(in Chinese).

[5] 姜宗来,陈维毅,樊瑜波. 中国生物力学研究展望[J]. 科技导报,2019,37(3):27-29.
JIANG Zonglai,CHEN Weiyi,FAN Yubo. Prospects of biomechanics in China[J]. Science & technology review,2019,37(3):27-29(in Chinese).

[6] TSUBONE T, TOBA N, TOMOKI U, et al. Prediction of fracture lines of the calcaneus using a three-dimensional finite element model[J]. Journal of orthopaedic research,2019,37(2):483-489.

[7] 弓健,程晓光,徐浩. 非骨密度 DXA 测量对骨折风险的预测——骨小梁评分(TBS):ISCD 2015 官方共识(第四部分)[J]. 中国骨质疏松杂志,2018,24(11):1401-1404.
GONG Jian,CHENG Xiaoguang,XU Hao. Fracture risk prediction by non-BMD DXA measures——trabecular bone score: The 2015 ISCD official positions[J]. Chinese journal of osteoporosis,2018, 24(11):1401-1404(in Chinese).

[8] BOUXSEIN M L,ZYSSET P,GLÜER C C,et al. Perspectives on the non-invasive evaluation of femoral strength in the assessment of hip fracture risk [J]. Osteoporosis international, 2020, 31 (3): 393-408.

[9] GUSTAFSSON A,TOGNINI M,BENGTSSON F,et al. Subject-specific FE models of the human femur predict fracture path and bone strength under single-leg-stance loading[J]. Journal of the mechanical behavior of biomedical materials,2021,113:104118.

[10] VILLAMOR E, MONSERRAT C, DEL RÍO L, et al. Prediction of osteoporotic hip fracture in postmenopausal women through patient-specific FE analyses and machine learning[J]. Computer methods and programs in biomedicine,2020,193:105484.

[11] SOLAN M C, SAKELLARIOU A. Posterior malleolus fractures: worth fixing[J]. The bone & joint journal,2017,99-B(11):1413-1419.

[12] AMPLA R,VASILIADIS A V,KATAKALOS K. Numerical simulation of the posterior malleolus fracture with the finite element method[J]. Journal of functional biomaterials,2020,11(1):14.

[13] LING M,ZHAN S,JIANG D J,et al. Where should Kirschner wires be placed when fixing patella fracture with modified tension-band wiring? A finite element analysis[J]. Journal of orthopaedic surgery and research,2019,14(1):14.

[14] RAMLEE M H, SULONG M A, GARCIA-NIETO E, et al. Biomechanical features of six design of the delta external fixator for

treating Pilon fracture: a finite element study[J]. Medical & biological engineering & computing,2018,56(10):1925-1938.

[15] 崔伟玲. 基于多体动力学和有限元方法对人体下肢生物力学的研究[D]. 太原:太原理工大学,2020.

[16] MONDAL S,GHOSH R. Bone remodelling around the tibia due to total ankle replacement: effects of implant material and implant-bone interfacial conditions[J]. Computer methods in biomechanics and biomedical engineering,2019,22(16):1247-1257.

[17] AFFATATO S,MEROLA M,RUGGIERO A. Development of a novel in silico model to investigate the influence of radial clearance on the acetabular cup contact pressure in hip implants[J]. Materials,2018,11(8):1282.

[18] KANG K T,SON J,KOH Y G,et al. Effect of femoral component position on biomechanical outcomes of unicompartmental knee arthroplasty[J]. The knee,2018,25(3):491-498.

[19] 张吉超,董跃福,牟志芳,等. 骨关节炎患者在不同步态角度下膝关节内部生物力学变化的有限元分析[J]. 中国组织工程研究,2022,26(9):1357-1361.
ZHANG Jichao, DONG Yuefu, MU Zhifang, et al. Finite element analysis of biomechanical changes in the osteoarthritis knee joint in different gait flexion angles[J]. Chinese journal of tissue engineering research,2022,26(9):1357-1361(in Chinese).

[20] 蒲放,樊瑜波. 康复辅具设计中的生物力学研究[J]. 医用生物力学,2013,28(4):363-365.
PU Fang,FAN Yubo. Biomechanical research for design of rehabilitation technical aids[J]. Journal of medical biomechanics,2013,28(4):363-365(in Chinese).

[21] 姜宗来. 发展生物力学造福人类健康——“十四五”我国生物力学研究发展战略思考[J]. 医用生物力学,2021,36(5):671-675.
JIANG Zonglai. Developing biomechanics, benefit human health: Pondering on the development strategy of biomechanics research during in the 14th five-year plan in China[J]. Journal of medical biomechanics,2021,36(5):671-675(in Chinese).

[22] LIN Y C,HUANG L Y,CHEN C S. Strength evaluation and modification of a 3D printed anterior ankle foot orthoses[J]. Applied sciences,2020,10(20):7289.

[23] 杨海艳,吴晓,冯晓华. 小腿残肢与接受腔的非线性有限元分析[J]. 医用生物力学,2019,34(3):232-236.
YANG Haiyan,WU Xiao,FENG Xiaohua. Non-linear finite element analysis of Trans-Tibial residual limb and prosthetic socket[J]. Journal of medical biomechanics, 2019, 34(3): 232-236(in Chinese).

[24] LI W T,LIU K P,LI C X,et al. Development and evaluation of a wearable lower limb rehabilitation robot[J]. Journal of bionic engineering,2022,19(3):688-699.

[25] XIONG Y, TAO X M. Compression garments for medical therapy and sports[J]. Polymers,2018,10(6):663.

[26] GHORBANI E, HASANI H, NEDOUSHAN R J, et al. Finite element modeling of the compression garments structural effect on the pressure applied to leg[J]. Fibers and polymers,2020,21(3):636-645.

[27] LU Y T,ZHANG D X,CHENG L L,et al. Evaluating the biomechanical interaction between the medical compression stocking and human calf using a highly anatomical fidelity three-dimensional finite element model[J]. Textile research journal,2021,91(11/12):1326-1340.

[28] LIN Y L,LI Y,YAO L,et al. Effects of deep knee flexion on skin pressure profile with lower limb device: A computational study[J]. Textile research journal,2020,90(17/18):1962-1973.

[29] 刘星辰,谢红. 基于有限元建模技术的下肢着袜舒适性分析[J]. 上海纺织科技,2021,49(11):18-21.
LIU Xingchen, XIE Hong. Analysis of the comfortability of lower limb socks based on finite element modeling technology[J]. Shanghai textile science & technology, 2021, 49(11): 18-21(in Chinese).

[30] 李世伟. 投掷运动肩部肌肉防护研究与产品开发[D]. 上海:上海工程技术大学,2016.

[31] 赵西西. 马拉松跑步状态下肢骨骼肌肉系统的防护研究与产品开发[D]. 上海:上海工程技术大学,2016.

[32] 柯思成,谢红,李杰聪. 有限元建模技术在预测鞋底减震性能中的应用研究[J]. 皮革科学与工程,2020,30(1):68-73.
KE Sicheng, XIE Hong, LI Jiecong. Application research of finite element modeling technology in predicting sole shock absorption performance[J]. Leather science and engineering,2020,30(1):68-73(in Chinese).

(编辑 黄崇亚 张璐)